



Universidad
Zaragoza

Análisis de posibles riesgos ambientales en el subsuelo del Maestrazgo vinculados a proyectos de extracción de gas no convencional mediante fracturación hidráulica



Paula Segura Palau.

Director: José Luis Simón Gómez.
Universidad de Zaragoza 2015

INDICE.

Abstract	Pág. 1
1. Planteamiento	Pág. 2
2. Objetivos	Pág. 3
3. Metodología	Pág. 3
4. Situación y contexto geológico	Pág. 4
<u>Presentación y discusión de los principales resultados obtenidos</u>	Pág. 7
5. Análisis del posible riesgo de contaminación de acuíferos	Pág. 7
5.1. <i>Unidades estratigráficas afectadas</i>	Pág. 7
5.2. <i>Estudio de la fracturación natural al E de Salsadella</i>	Pág. 8
5.2.1. Fracturación a escala macroestructural	Pág. 8
5.2.2. Fracturación a escala mesoestructural	Pág. 13
5.3. <i>Análisis de las condiciones de esfuerzo para la fracturación hidráulica</i>	Pág. 16
5.3.1. Cálculo experimental del número de Poisson	Pág. 16
5.3.2. Cálculo experimental de la línea de resistencia intrínseca	Pág. 16
5.3.3. Análisis del estado de esfuerzos en el subsuelo	Pág. 17
5.3.4. Cálculo de la presión de fluidos necesaria para la fracturación hidráulica	Pág. 18
5.4. <i>El acuífero del Maestrazgo</i>	Pág. 18
5.5. <i>Análisis del riesgo de contaminación del acuífero</i>	Pág. 21
6. Análisis del posible riesgo de sismicidad inducida	Pág. 21
6.1. <i>El problema de la sismicidad inducida</i>	Pág. 21
6.2. <i>Fallas activas en el Maestrat</i>	Pág. 21
6.3. <i>Análisis de las condiciones de esfuerzo para la reactivación de fallas activas</i>	Pág. 22
6.4. <i>Discusión: las enseñanzas del “Proyecto Castor”</i>	Pág. 23
7. Conclusiones	Pág. 23
8. Bibliografía	Pág. 23
Agradecimientos	Pág. 25
Anexos	Pág. 26
Anexo 1. Paleogeografía de la Cuenca Ibérica en el ciclo Pérmico superior-Jurásico inferior	Pág. 26
Anexo 2. Gráficas cálculo empírico del número de Poisson	Pág. 27
Anexo 3. Tabla de fallas activas en la zona del Maestrat	Pág. 28

Imagen de portada: Fotografía panorámica del entorno de Salsadella (Castellón)

Abstract

The present study analyzes the possible environmental risk during the process of hydraulic fracturing (*fracking*) in the Maestrat zone (Castellón), where several research projects of non-conventional gas (Aristóteles, Pitágoras and Arquímedes projects) that need the application of this technology have been solicited to regional authorities. The traces of existing hydrocarbons in Mas d'Ascla Formation (Upper Jurassic) could be the target for such prospections, so that our study will be focused on this unit and on those immediately above and below it.

We analyze two probable risks: contamination of the Maestrazgo aquifer and induced seismicity.

To analyze the risk of aquifer contamination, we characterized the natural fracture network, its density and preferred directions, to valorate its hydraulic transmissivity. An area E of Salsadella, representative of the entire Maestrat zone and showing good exposures of the Mas d'Ascla and adjoining formations, as been surveyed in detail. We have also estimated the thickness of series affected by the faults in this zone.

Values of lithostatic stress in the subsoil have been calculated at the maximum depth to which these formations appear in this zone. We based our calculation on this depth and on the experimental calculation of the Poisson number of samples collected in the field. The Poisson number was obtained from uniaxial compression tests, in which the final resistance of the sample and the angle between the compression axis and the resulting fracture planes were also obtained. These results permit to reconstruct the line of intrinsic resistance of the rock (LRI). Through a graphical procedure on Mohr's circle we calculate the fluid pressure needed to fracturing the different units to the maximum depth. The resulting values are 13.3 Mpa, 6.9 Mpa and 9.4 Mpa for the Polpís, Mas d'Ascla and Bovalar Formations, respectively.

We have also compiled information about the Maestrazgo aquifer to know its behaviour, the porosity of the different units, the piezometric surface, etc. We can conclude that, provided that the fluid pressure needed for fracturing the Mas d'Ascla Fm. is lower than for the other formations, hydraulic fractures of the first one should not propagate, at first, to the others, and there would not be danger of transmission of fluids to the above mentioned across the new created fractures. Nevertheless, the natural fracture network, which has densities between of 3 to 9 km/km², varied directions, propagation distances across the series up to 850 m, and important openings to mesostructural scale (partly due to karstification), can provide the necessary transmissivity for the contaminated fluids to flow, and therefore the risk of affection to the aquifer is considered to be high.

With respect to induced seismicity, we do not consider the microseismicity that will be generated during hydraulic fracturing, which is not important, but that produced owing to reactivation of active faults. Our study zone shows several active faults included within the QAFI database of IGME: faults of Alcalá de Xivert, Torreblanca–north and Serra d'Irta). They show a preferred NNE-SSW direction and are linked to the Gulf of Valencia rifting. From the experience of the Castor Project, in which there was demonstrated that a small overpressure in the gas reservoir was enough to induce moderate seismicity in the neighbouring active faults, we can conclude that there are a risk of reactivation of Alcalá de Xivert, Torreblanca-north and Serra d'Irta faults in the case that the fluid was injected to the necessary pressure for fracturing the Mas d'Ascla Formation.

1. Planteamiento

El presente trabajo trata de analizar los posibles riesgos ambientales ocasionados durante el proceso de fracturación hidráulica (*fracking*) en la zona del Maestrat (Castellón), donde hay solicitados varios permisos de investigación de gas no convencional (Aristóteles, Pitágoras y Arquímedes; Fig. 1) que conllevarían la aplicación de esa técnica. La empresa solicitante, *Montero Energy* declaró en su momento en los medios de comunicación que estaba interesada sobre todo en la prospección de formaciones del Jurásico. Los indicios de hidrocarburos hallados en la formación Mas d'Ascla, del Jurásico superior (Salas y Permanyer, 2003), sustentan esa idea inicial, y es por ello por lo que nuestro estudio se centrará en esta unidad y en las inmediatamente superior e inferior.



Figura 1. Localización de los proyectos de investigación solicitados por *Montero Energy* en el norte de la provincia de Castellón (comarcas de El Baix Maestrat y Els Ports) (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2014). Recuadro rojo: situación de la zona de estudio en las proximidades de Salsadella.

Antes de la realización del *fracking* en una zona determinada se deben realizar unos estudios muy exhaustivos, puesto que se tiene constancia de que la extracción de gas mediante este proceso puede ocasionar impactos como son: 1) La posibilidad de *contaminar los acuíferos* (ya sea por la incorporación de aditivos químicos nocivos del agua de inyección, contaminación por metales pesados, sustancias tóxicas, material radioactivo o aguas de salinidad extrema de capas profundas que el fluido movilice hacia los acuíferos cercanos, o directamente por contaminación con el propio gas que se explota). 2) La *posibilidad de ocasionar sismos* (ya sean por la reactivación de fallas preexistentes o los microseismos que se generan durante el proceso de fracturación hidráulica). 3) El *consumo de agua*, que depende de las características geológicas del reservorio, la profundidad alcanzada por los pozos y el número de etapas de fracturación hidráulica. En términos generales puede considerarse que cada etapa de estimulación por fracturación hidráulica, requiere entre 1.000 y 2.000 m³ de agua, lo cual hace que para una estimulación media/alta de 10 etapas por pozo se consuman entre 10.000 y 20.000 m³ (Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas, 2013). 4)

Radiactividad en las aguas de retorno; esta radiactividad es de tipo natural, debido a que las pizarras y el carbón suelen contener más elementos radioactivos que cualquier otra roca). 5) *Emisiones incontroladas de metano*; aunque no supone un peligro para la salud pública, tiene un potente efecto invernadero, 23 veces superior al del CO₂. 6) El *uso extensivo del suelo* debido a la gran cantidad de pozos que se requieren para explotar un yacimiento, con 1 a 2 Ha de ocupación por cada pozo y una densa red de caminos de conexión entre ellos y con las carreteras necesarias. Para cada uno de los problemas ambientales deberían realizarse estudios que permitieran su mitigación y control, de carácter interdisciplinar para analizar asimismo la interacción entre todos los procesos.

A la vista de las características geológicas del Maestrat, y limitándonos a aquellos impactos y riesgos que tienen incidencia en el subsuelo, este trabajo se centrará en: 1) peligro de *contaminación del acuífero*, el cual tiene que ver con la transmisividad hidráulica de las formaciones y, por tanto, con la fracturación natural y con la fracturación que se pueda inducir; 2) peligro de *sismicidad inducida* debido a las fallas activas que se pueden encontrar en la zona.

Aunque nuestro análisis de los posibles riesgos ambientales afecta a toda la zona del Maestrat, el estudio de detalle lo centraremos en los alrededores de Salsadella (Castellón), puesto que teníamos facilidad de acceso a todas las unidades importantes para nuestro estudio en campo (Fm. Polpís, Fm. Mas d'Ascla y Fm. Bovalar).

2. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son: 1) Caracterizar la fracturación de la zona del Maestrat a partir de los datos obtenidos en una zona concreta que sea representativa (alrededores de Salsadella). 2) Analizar las condiciones de esfuerzo del subsuelo y calcular la presión de fluidos que sería necesaria para la fracturación de las unidades jurásicas estudiadas. 3) Analizar el riesgo de contaminación debido a la transmisión hidráulica a través de la red de fracturas (tanto naturales, que ya están presentes, como las que vamos a crear debido a la realización del *fracking*). 4) Evaluar el riesgo de sismicidad inducida a partir de la presencia de fallas activas en la zona.

3. Metodología

1) Realización de un estudio bibliográfico y una recopilación de material, como por ejemplo el Mapa Geológico 1:50.000 de la zona (hojas n^{os} 571, Vinaroz y 594, Alcalá de Chivert) o la información hidrogeológica del acuífero del Maestrazgo.

2) Observaciones en campo, recogida de muestras para su posterior estudio en laboratorio y observación al microscopio en lámina delgada, orientado todo ello a la caracterización litológica de las diferentes unidades (Fm. Polpís, Mas d'Ascla y Bovalar).

3) Corte geológico para poder reconstruir la distribución de las unidades en el subsuelo y ver a qué profundidad se podría encontrar la Fm. Mas d'Ascla. Para poder acotar la posición de las unidades en dicho corte, éste se realiza en las proximidades del sondeo "Salsadella 1", perforado en su momento para la exploración de hidrocarburos y del cual tenemos información (Klimowitz et al., 2006)

4) Análisis a escala macroestructural de la fracturación natural existente en la zona. Se ha elaborado un mapa de fracturación a partir de la observación de fotografías aéreas, que permite diferenciar las familias predominantes de las fallas, contabilizar las longitudes de las fallas, estimar el espesor de serie afectado por cada una (el alcance, por tanto, de su propagación), y calcular la densidad de fracturación de cada unidad.

5) Análisis de la fracturación natural a escala mesoestructural, definiendo las familias existentes a escala de afloramiento y comparándolas con las obtenidas a escala macroestructural. También se ha evaluado el papel de estas familias en la transmisividad hidráulica de cada formación, observando su anchura o separación (muy abierta, abierta o cerrada) y cuantificando sus espaciados.

6) Simulación de las condiciones de esfuerzo reales para la fracturación hidráulica en nuestra zona de estudio. Para ello debemos empezar por calcular los valores de esfuerzo litostático a una profundidad determinada, obviando la componente tectónica que, aunque existe (estamos en una zona de tectónica activa vinculada al *rift* del Surco de Valencia: Simón, 1982), no podemos estimar. Primeramente, realizaremos un cálculo experimental del número de Poisson a partir de los resultados que obtuvimos durante la realización de ensayos de compresión simple, en dos probetas por cada una de las tres formaciones estudiadas. Conforme se aplicaban cargas crecientes a dichas probetas, anotamos las variaciones de longitud observadas en los ejes X y Z. Estos datos los representamos en una gráfica (deformación unitaria de Z frente a la deformación unitaria en X) a la que ajustamos una recta de regresión que nos da el valor del número de Poisson m ($m = |e_z| / |e_x|$). A partir de ahí hemos evaluado las condiciones de esfuerzo reales a la máxima profundidad a la que se encuentra cada formación en nuestro corte geológico, calculando el esfuerzo vertical $\sigma_z = \rho gh$, y el esfuerzo horizontal ($\sigma_x = \sigma_y = \frac{\rho gh}{m-1}$) (Price, 1966), donde m es el número de Poisson obtenido anteriormente. Para simular las condiciones de la fracturación hidráulica a partir de esa situación de esfuerzos de partida, hemos de conocer los parámetros de resistencia de las muestras de roca. Utilizamos para ello los resultados de los mismos ensayos: la resistencia de cada muestra a la compresión simple y los valores del ángulo α que forman las fracturas producidas con σ_z (es decir, con el eje mayor las probetas). La línea de resistencia intrínseca (LRI) de cada unidad se obtiene mediante la tangente al círculo de Mohr ($\sigma_1 = \sigma_{zR}$ en el momento de la rotura, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_x = 0$) que pase por los valores de α . Extrapolando la LRI hacia la izquierda se puede estimar el valor de la cohesión C (ordenada en el origen del LRI) y de la resistencia a la tracción T ($\approx \frac{1}{2} C$). Dibujando el círculo de Mohr que representa el estado de esfuerzos litostático y trasladándolo a la izquierda hasta que toque la LRI conoceremos el valor de la presión de fluidos (P_f) necesaria para inducir la fracturación hidráulica (Price, 1966).

7) Caracterización del acuífero del Maestrazgo a partir de información bibliográfica y datos de sondeos (Mejías et al., 2012; IGME), y realización de un corte hidrogeológico en el que se plasman las unidades que abarca y su relación espacial con la Fm. Mas d'Ascla.

8) Localización de las fallas activas que se observan en el Maestrat, que podrían ser susceptibles de sufrir una reactivación en caso de aumentar la presión proveniente de la inyección de fluidos del *fracking*. Valoración de las condiciones de esfuerzo que deberíamos tener para que esas fallas activas se reactivaran.

4. Situación y contexto geológico

- Situación general.

El área de estudio se sitúa al noreste de la Península Ibérica. El Maestrazgo es la región geográfica y geológica más oriental de la Cordillera Ibérica, que ocupa el norte de Castellón y el este de Teruel. Dentro de la provincia de Castellón, se enmarcan en esta zona las comarcas del Baix Maestrat, Alt Maestrat y Els Ports.

El área de estudio intensivo se centra más concretamente en la comarca del Baix Maestrat, en los alrededores del municipio de Salsadella (figura 2).

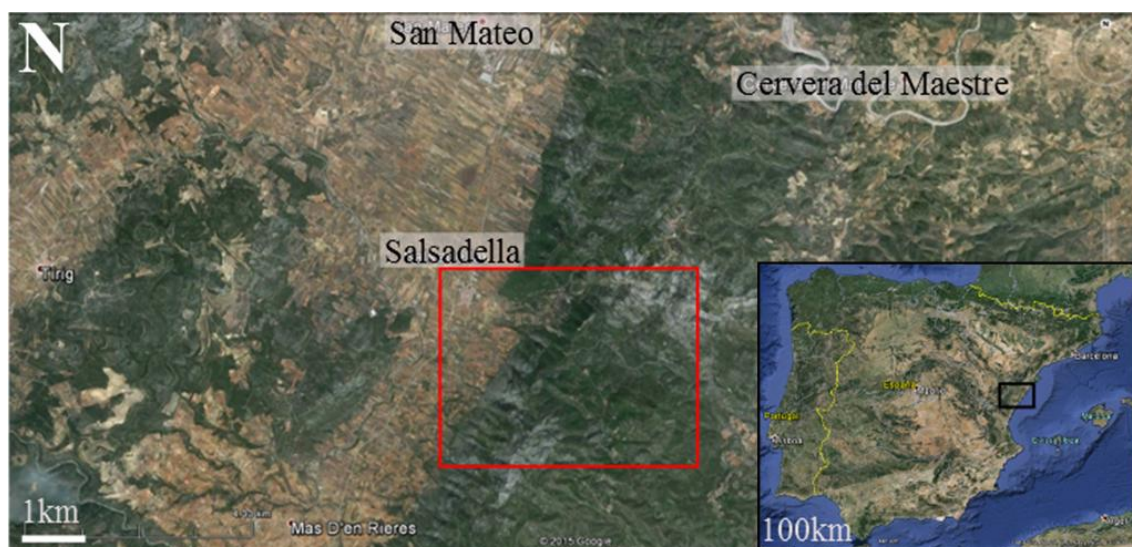


Figura 2. Localización de la zona de estudio. En el recuadro negro del mapa de la Península se indica la zona ampliada en la imagen general, y en ésta, recuadrada en rojo, la situación del área de estudio (Google Earth, 2015).

Salsadella se encuentra en la zona más oriental de la Cordillera Ibérica. Esta cordillera se extiende entre la Meseta Castellana y el Mar Mediterráneo, con una orientación predominante NW-SE (figura 3).

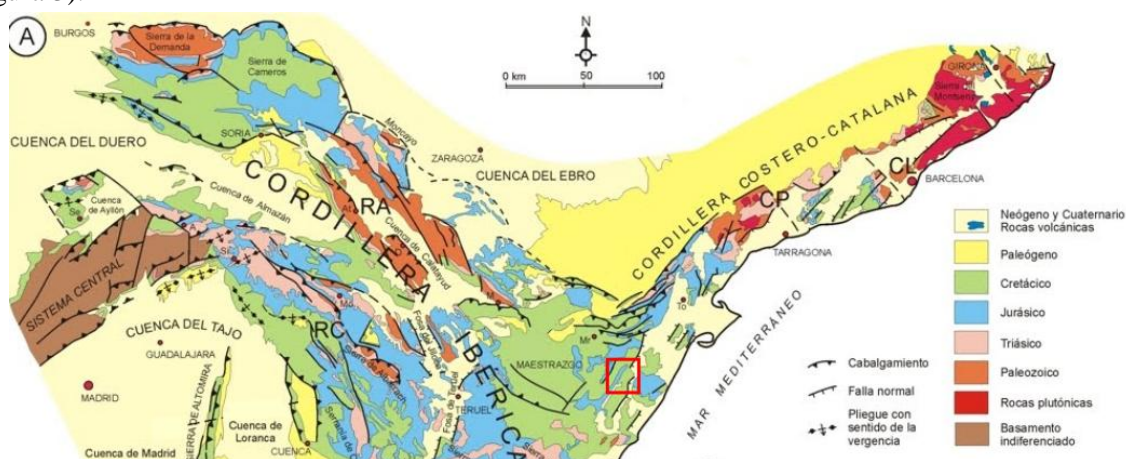


Figura 3. Mapa geológico de la Cordillera Ibérica y situación de la zona de estudio (Gutiérrez-Marco et al., 2004).

La Cordillera Ibérica es una cordillera montañosa que resulta de la inversión de la cuenca mesozoica Ibérica, cuyas fallas normales son reactivadas como cabalgamientos de basamento y cobertera durante el Terciario y contribuyen así a acortar la Placa Ibérica (Gutiérrez-Marco et al., 2004).

- Estratigrafía.

La cuenca Ibérica es una cuenca intracontinental donde la sedimentación alcanzó 6,5 km de espesor durante el Mesozoico en la cuenca del Maestrazgo (Salas y Guimerà, 1996). Se han diferenciado 6 etapas con alternancia de *rift* y *postrift* durante el Mesozoico (figura 4): 1) *Rift* triásico (Pérmico superior-Hettangiense), 2) *Postrift* Jurásico inferior y medio (Sinemuriense-Oxfordiense), 3) *Rift* jurásico superior-neocomiense (Oxfordiense terminal-Valanginiense superior), 4) *Postrift* hauteriviense (Valanginiense superior), 5) *Rift* cretácico inferior (Hauteriviense terminal-Albiense medio), y 6) *Postrift* cretácico superior (Albiense superior-Senoniense) (Salas y Casas, 1993).

En el Maestrazgo oriental, y en concreto en la zona de Salsadella, aparecen unidades del Jurásico inferior (Pliensbachense), Jurásico medio (Calloviense) y Jurásico superior (Oxfordiense, Kimmeridgiense y Tithoniense). Seguidamente, se depositan los materiales del Cretácico inferior en una serie bastante completa. El Cretácico superior (Cenomaniense, Turoniense y Senoniense) solo aflora en la hoja de Alcalá de Chivert. Posteriormente se depositan materiales del Terciario y Cuaternario.

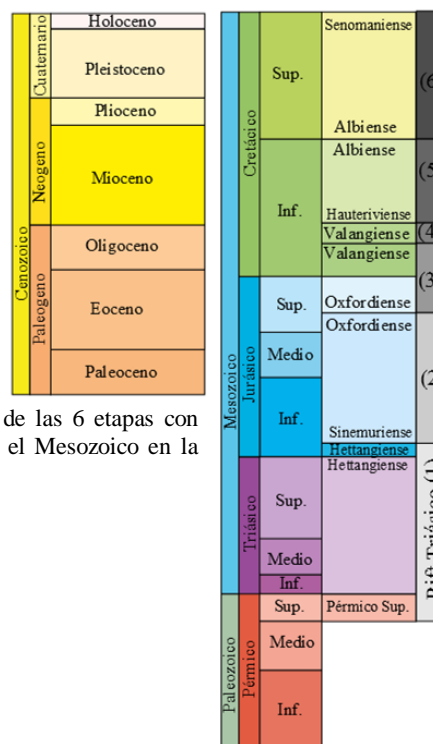


Figura 4. Representación temporal de las 6 etapas con alternancia de rift y postrift durante el Mesozoico en la zona de estudio.

- Tectónica.

En la zona del Maestrazgo existen numerosas fallas y fracturas naturales que cortan las formaciones jurásicas y cretácicas. Muchas se originaron durante el propio Jurásico superior-Cretácico inferior debido al estiramiento de la corteza que dio origen a la cuenca sedimentaria del Maestrazgo. Estas fracturas fueron reactivadas durante la compresión Alpina (Paleógeno), y finalmente en las etapas extensionales más recientes (Neógeno-Cuaternario), con una dirección dominante NNE-SSW debido a su vinculación con la apertura del golfo de Valencia. El resultado de todas estas etapas de fracturación es una densa red con direcciones predominantes NNE-SSW, NE-SW y E-W.

Algunas fallas tienen evidencia de su actividad cuaternaria, puesto que rompen y desplazan sedimentos y formas de relieve cuaternarias, algunas incluso interactúan con la red de drenaje (Simón et al., 2013).

- Geología económica.

La zona tiene un creciente interés petrolífero debido a que, en principio, se puede considerar toda la serie Oxfordiense-Berriasiense como posible roca madre del petróleo que ha sido explotado durante décadas en la plataforma costera. Las biomicritas y micritas arcillosas son altamente fértiles y con pátina propia de oxidación de hidrocarburos. Las fallas catalanas constituirían buenas trampas para el almacenamiento de petróleo, aunque no se descarta la idea de que puedan constituirse en vías de escape (Martín García et al., 1972). Actualmente, también tiene importancia debido a los proyectos que se están intentando llevar a cabo para la extracción de gas mediante la fracturación hidráulica (*fracking*).

Haciendo referencia a las aguas subterráneas, es una de las zonas peninsulares con mayor interés hidrogeológico, debido a que hay varios tramos que tienen una buena transmisividad, tanto por su textura propia (Fm. Cortes de Tajuña), su elevado grado de fracturación e incluso la karstificación fósil (Martín García et al., 1972).

Presentación y discusión de los principales resultados obtenidos

5. Análisis del posible riesgo de contaminación de acuíferos

5.1. Unidades estratigráficas afectadas.

El estudio realizado se centra en las formaciones Polpís, Mas d'Ascla y Bovalar, todas correspondientes al Jurásico superior.

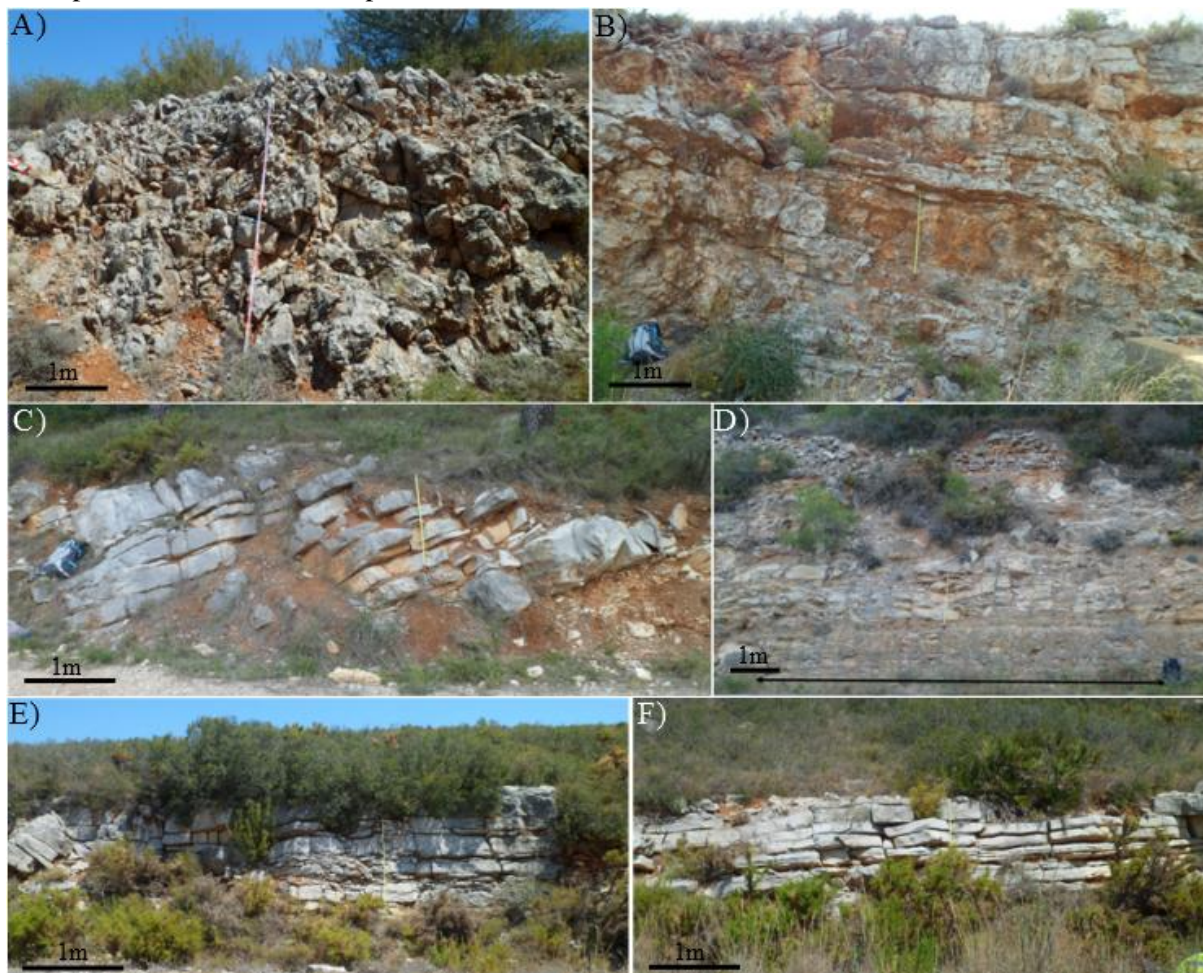


Figura 5. A y B) Afloramientos de la Fm. Polpís. C y D) Afloramientos de la Fm. Mas d'Ascla. E y F) Afloramientos de la Fm. Bovalar (todos ellos en el entorno de Salsadella).

La *Formación Polpís* (Oxfordiense-Kimeridgiense inferior) está constituida por calizas y dolomías de color pardo oscuro (figura 5 A y B), midiéndose 270 m de espesor cerca de Santa Magdalena. La parte superior está formada por dolomías y calizas dolomitizadas y en la parte inferior aparecen calizas de grano muy fino (micritas) parcialmente recrystalizadas en microesparita.

A escala de microscopio se puede observar una textura con ligera variación de *mudstone* a *wackstone* bioclástico, según la clasificación Dunham (1962), dependiendo de la zona de la lámina. Se puede observar una matriz micrítica con presencia de fragmentos de bivalvos y peloides recrystalizados, e incluso alguna espícula de esponja silíceas (figura 6. A).

La *Formación Mas d'Ascla* (Kimeridgiense inferior-medio) es un conjunto de margas, margocalizas y calizas de grano muy fino de color gris-beige, distribuidas en lechos laminados o capas con fractura concoidal (figura 5 C y D). Presenta espesores variables, midiéndose entre 80-100 metros de margocalizas en las inmediaciones de la Ermita de San José (cerca de Salsadella).

Esta formación presenta los valores más altos de TOC (Total Organic Carbon) en los primeros 50 metros del Cortejo Transgresivo (TST), siendo el valor de 1,26% según Salas y Permanyer (2003). Unos valores de esta magnitud y en ese contexto se pueden interpretar como síntomas de un episodio pobre en oxígeno (Permanyer et al., 2000).

La lámina delgada se observa que es más oscura que las demás formaciones. Se trata de un *wackstone* según la clasificación Dunham (1962) con presencia de bioturbación, materia orgánica piritizada, bioclastos (fragmentos de bivalvos), foraminíferos y peloides (figura 6.B).

La *Formación Bovalar* (Kimmeridgiense superior-Portlandiense) está formada por calizas y calizas dolomitizadas, siendo las dolomías más frecuentes en la base de la unidad (figura 5 E y F). Las calizas son de color crema, bien estratificadas. Cerca de Encanes se midieron espesores de 100-150 m.

Al microscopio se puede ver que se trata de un *mudstone* muy bioturbado, según la clasificación Dunham (1962), con presencia de bioclastos (algún bivalvo, más concretamente) (figura 6.C).

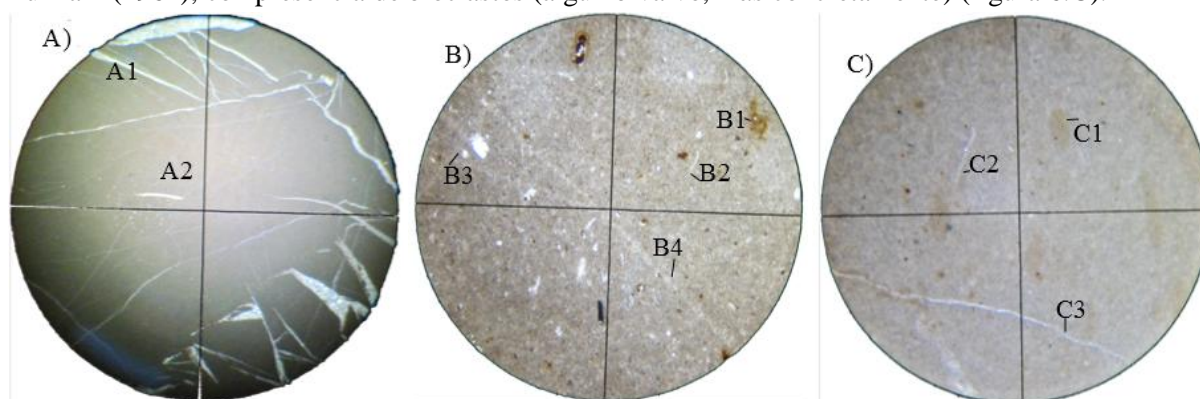


Figura 6. Fotografías realizadas sobre las láminas delgadas. **A)** Fm. Polpís bajo la lupa del microscopio; se observan fracturas (A1) y espículas de esponja silícea (A2). **B)** Fm. Mas d'Ascla, a 10 aumentos; se observa la materia orgánica (B1), bioclastos (B2), peloides (B3) y fracturas (B4). **C)** Fm. Bovalar, a 10 aumentos; se observa una zona con bioturbación (C1), bioclastos (C2) y fracturas (C3).

5.2. Estudio de la fracturación natural al E de Salsadella

5.2.1. Fracturación a escala macroestructural

La estructura general de la zona del Maestrat muestra estructuras de plegamiento muy laxas atravesadas por una gran cantidad de fallas que son las que realmente la caracterizan. Éstas son producto de las tres etapas: *rift* mesozoico, compresión paleógena y, sobre todo, la extensión neógeno-cuaternaria. Para mostrar esa estructura a escala macroestructural, se ha realizado un corte geológico con dirección NW-SE entre Salsadella y la costa (ver situación en figura 7). Dicho corte pasa por las proximidades del sondeo “Salsadella 1”, lo que permite conocer información real del subsuelo en este punto (Klimowitz, et al., 2006) y extrapolarla al resto del corte.

Durante la realización del corte geológico (figura 8), nos encontramos con el problema de si en la zona de estudio aparecía o no el Keuper, puesto que en el pozo de sondeo no se tenía constancia de la aparición de esta unidad. Basándonos en la reconstrucción propuesta por Capote et al., (2002) para la Cuenca Ibérica en el Pérmico superior-Jurásico inferior (Anexo 1), podemos interpretar que la activación de un sistema de fallas durante ese periodo podría haber dado origen a la diferente disposición del Keuper en la zona, pudiendo permanecer en los bloques hundidos y haberse erosionado en los bloques levantados.

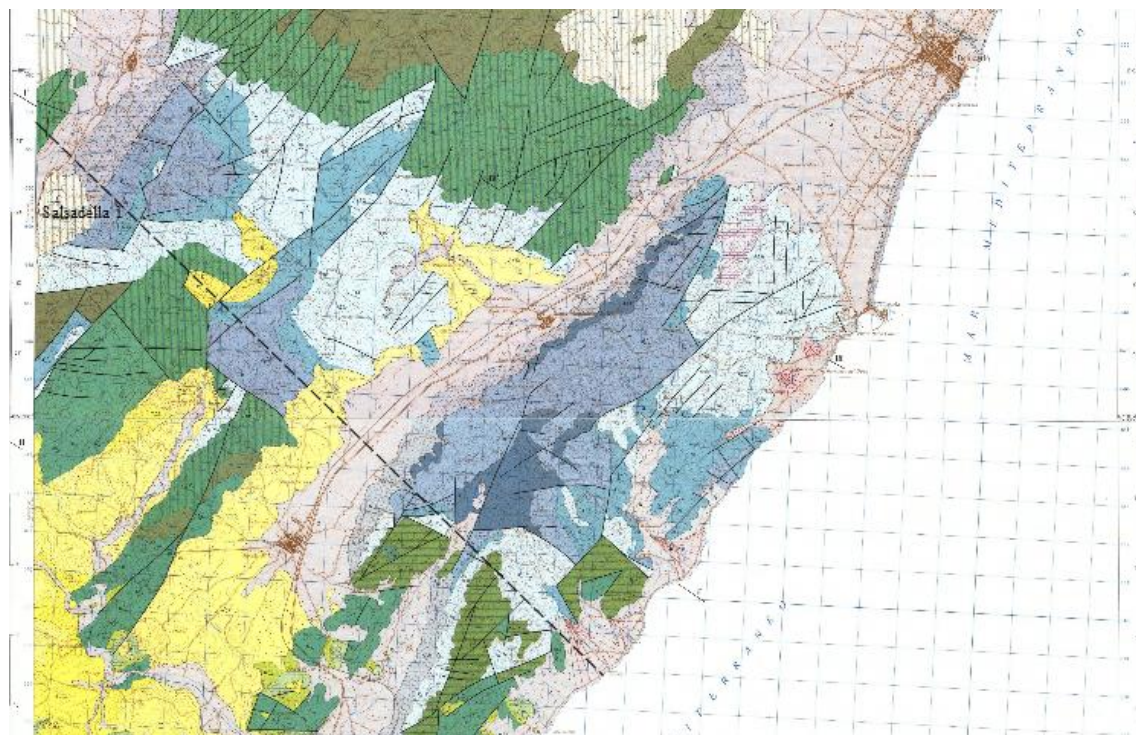


Figura 7. Mapa geológico de la zona de estudio: Mapa Geológico Nacional 1:50.000, hojas nº 571 (Vinaroz) y 594 (Alcalá de Chivert) (Martín García et al., 1972; Esnaola Gómez y Martín Fernández, 1972). Se muestra la localización del pozo “Salsadella 1” y del corte geológico e hidrogeológico (en línea discontinua).

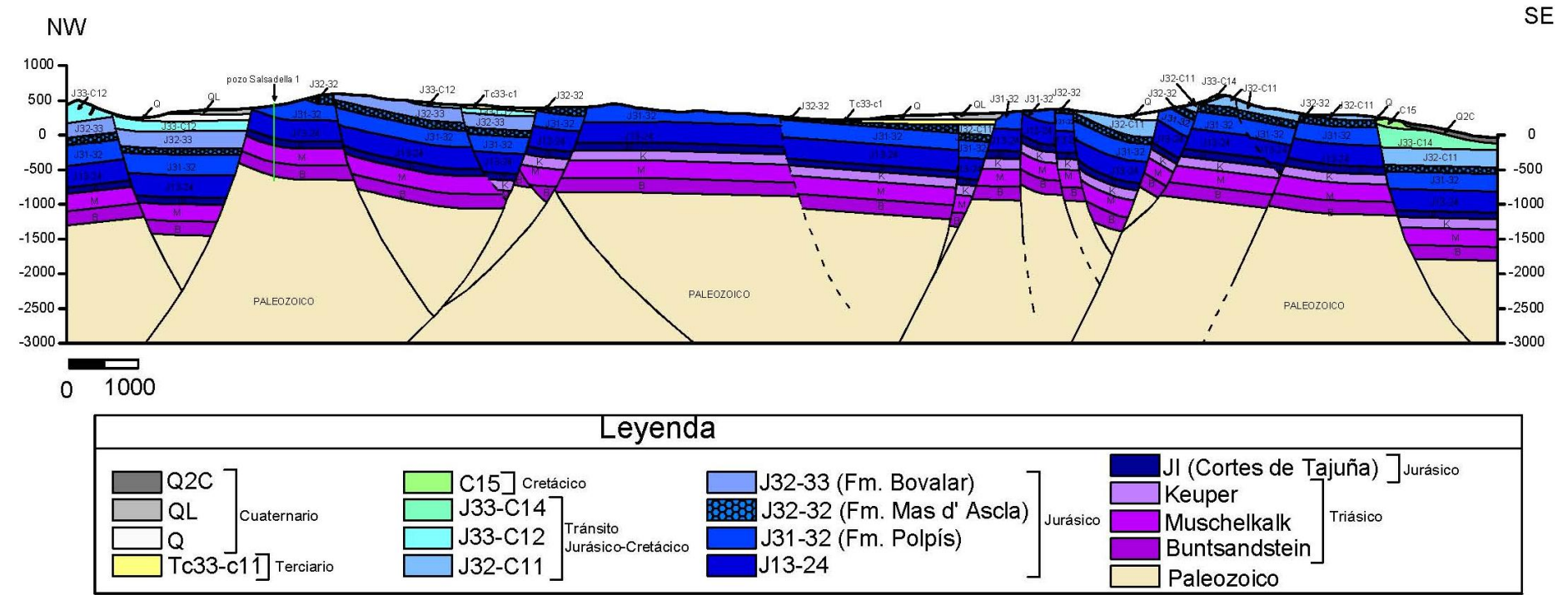


Figura 8. Corte geológico del área estudiada (ver situación en Fig. 7).

Como se puede observar en el corte geológico (figura 8), las fallas son lítricas, en su gran mayoría, y presentan buzamientos de entre 40 y 85° aproximadamente, siendo más verticalizadas en superficie y perdiendo buzamiento en profundidad. Las fallas cortan a toda la serie triásica, jurásica y cretácica de la zona, observándose que en algunos casos llegan a cortar incluso el Terciario y Cuaternario, lo cual nos indica que son fallas activas. El nivel de despegue está en el Paleozoico; según Roca y Guimerà (1992), a una profundidad de entre 11 y 14 km en la corteza. Se puede observar la similitud en cuanto a número de fallas sintéticas y antitéticas respecto al *rift*.

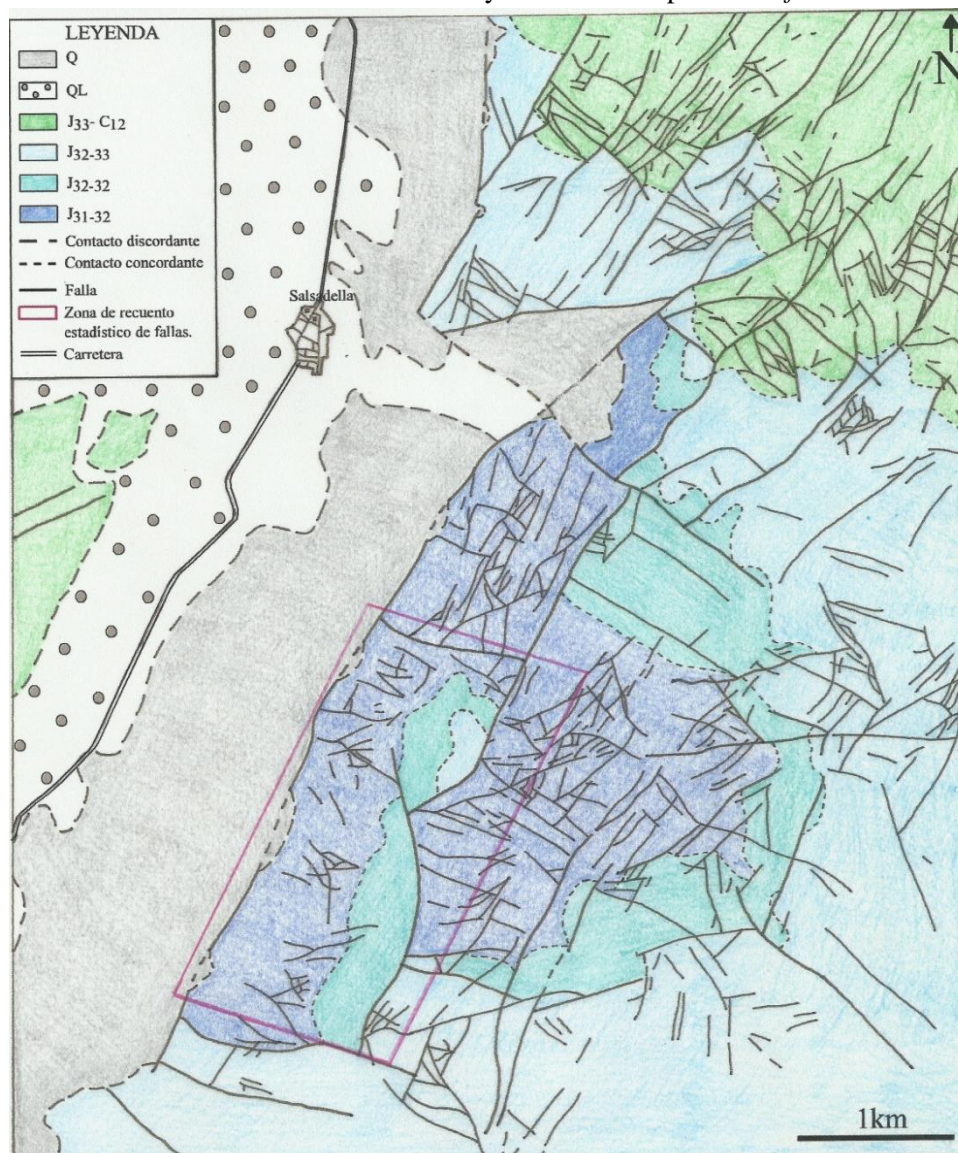


Figura 9. Mapa de fracturación de la zona al SE de Salsadella. La denominación de las unidades se corresponde con la del Mapa Geológico Nacional 1:50.000, hoja 571 (Vinaroz): J₃₁₋₃₂ (Oxfordiense-Kimeridgiense inferior), J₃₂₋₃₂ (Kimeridgiense inferior-Medio) Fm. Mas d'Ascla, J₃₂₋₃₃ (Kimeridgiense superior-Portlandiense), J₃₃-C₁₂ (Portlandiense-Valanginiense), QL (piedemonte cuaternario), Q (Cuaternario indiferenciado). El área delimitada por un rectángulo rosa es donde se realiza el análisis exhaustivo de las fallas.

Una visión de mayor detalle de la fracturación se muestra en el mapa de la figura 9, realizado para una zona piloto al E de Salsadella a partir de fotografías aéreas de escala aproximada 1:30.000 (vuelo de 1957). A partir de dicho mapa se ha realizado un análisis de direcciones mediante diagramas en rosa para determinar las familias de fallas dominantes (figura 10).

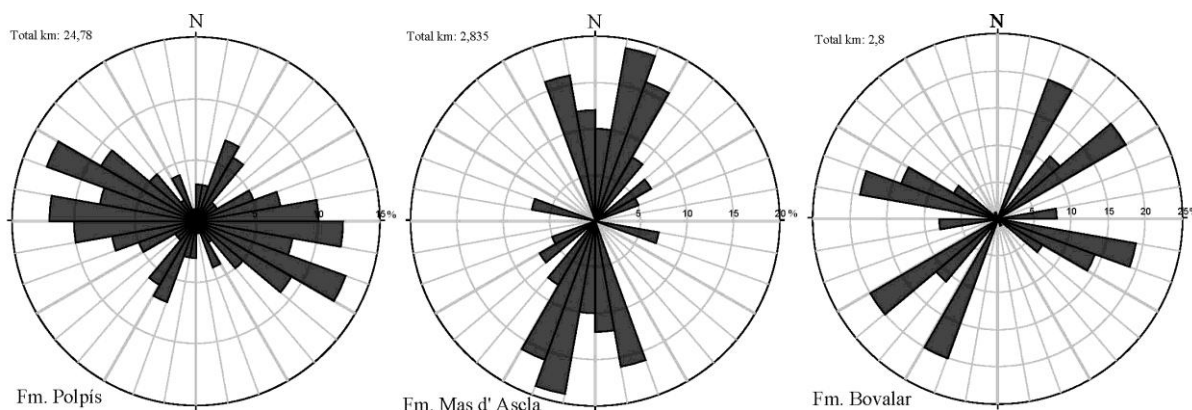


Figura 10. Rosas de fracturación, ponderadas según la longitud de la traza observada en el mapa de fracturación (figura 9).

Podemos observar que la Fm. Polpís y la Fm. Mas d'Ascla tienen una dirección de fracturas predominante en cada una: WNW-ESE para el primer caso y NNE-SSW para el segundo. En cambio, para la Fm. Bovalar se pueden ver tres direcciones bien diferenciadas, una entre 020 y 030, otra entre 050 y 060 y una última entre 100 y 120. De todas ellas, es la Fm. Mas d'Ascla la que presenta una dirección de fallas más similar al dirección predominante en el Maestrat y más compatible con el estado de esfuerzos actual.

Seguidamente, calcularemos la densidad de fracturación para cada unidad, midiendo las longitudes de las diferentes trazas de falla en el mapa de fracturación y dividiéndolo por la superficie aflorante de cada una de las formaciones. Los resultados se muestran en la tabla 1, donde se observa que la densidad de fracturación es muy alta para la Fm. Polpís y Bovalar, variando entre 8 y 9 km/km², y la mínima se encontraría en la Fm. Mas d'Ascla (3,62 km/km²).

	Fm. Polpís	Fm. Mas d'Ascla	Fm. Bovalar
Longitud acumulada de trazas de falla (km)	24,78	2,835	2,8
Superficie aflorante (km²)	2,98	0,78	0,32
Densidad de fracturación (km/km²)	8,32	3,62	8,89

Tabla 1. Tabla resumen de la longitud acumulada de las trazas de falla medidas en el recuadro rosa delimitado en el mapa de fracturación (figura 9), la superficie aflorante para cada una de las unidades en dicha área, y la densidad de fracturación obtenida.

Otro aspecto que debemos considerar es el espesor de serie al que afectan dichas fallas, puesto que cuanto mayores dimensiones presenten mayor será la conductividad hidráulica a través de esas formaciones. Se ha realizado un recuento detallado de esos espesores afectados dentro del recuadro rosa en el mapa de fracturación (figura 9) obteniendo el histograma que se muestra en la figura 11.

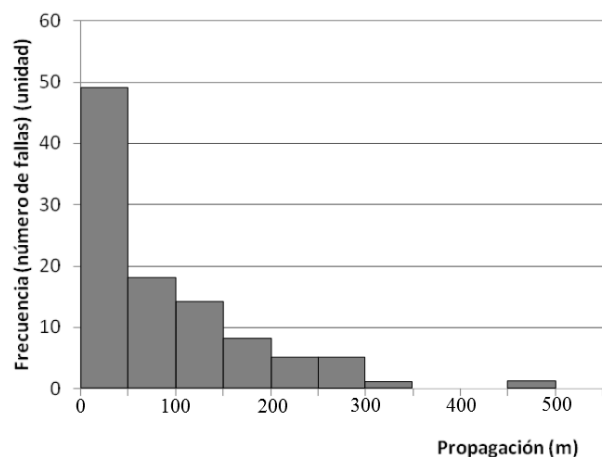


Figura 11. Histograma de frecuencia que representa el espesor de serie estratigráfica a través de la cual se han propagado las fallas cartografiadas dentro del recuadro rosa del mapa de fracturación (figura 9).

Se observa que, aunque hay un predominio de fallas que afectan a un espesor de serie entre 0 y 50 metros, un 34% de fallas superan los 100 m, pudiendo en algún caso llegar a afectar a entre 450 y 500 metros. Ya fuera de la zona delimitada por el recuadro rosa (figura 9), observamos que hay varias fallas de mayores dimensiones que afectan a espesores de entre 500 y 700 m, y en algún caso extremo hasta unos 800-850 m de serie.

5.2.2. Fracturación a escala mesoestructural

La caracterización de las fracturas que afectan a cada formación se ha realizado también en campo en una serie de afloramientos, anotando las diferentes direcciones de las fracturas y sus características.

Como se ve en la figura 12, la Fm. Mas d'Ascla solo presenta una familia de fracturas, con una orientación predominante NE-SW, denominada familia A. La Fm. Polpís presenta tres familias: NE-SW (A), WNW-ESE (B) y NNW-SSE (C). Finalmente, para la Fm. Bovalar se observa una variación de direcciones predominando la ENE-WSW con una ligera variación en la familia A respecto a las demás unidades (por esta razón se le ha considerado como una subfamilia A'), y una familia B entre 110 y 120°.

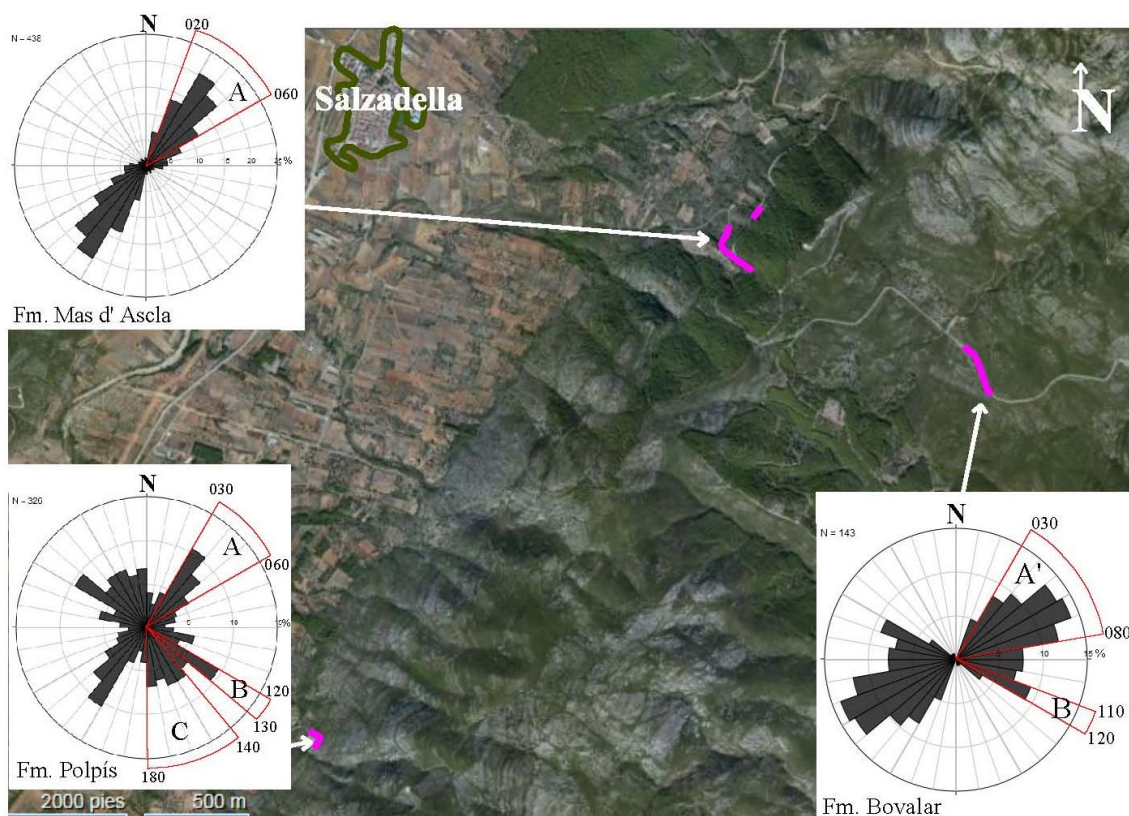


Figura 12. Representación de las familias de fracturas observadas para las diferentes formaciones estudiadas, con la localización (en morado) de los afloramientos en que se realizó la toma de datos.

Una vez diferenciadas las familias observadas a escala de afloramiento las compararemos con los resultados de la observación macroestructural, obteniendo los resultados que muestra la tabla 2. Se observa que hay una ligera variación entre las observaciones a ambas escalas, siendo las diferencias más representativas la aparición de una familia A' en la Fm. Polpís que no se observa a escala meso, y la aparición de una familia C en la Fm. Mas d' Ascla a escala macro que no se observa a escala meso. Además, también se observan unas ligeras variaciones en las direcciones de las familias identificadas.

	Escala mesoestructural			Escala macroestructural		
	Fm. Polpís	Fm. Mas d' Ascla	Fm. Bovalar	Fm. Polpís	Fm. Mas d' Ascla	Fm. Bovalar
Familia A	030-060	020-060	—	020-040	000-030	—
Familia A'	—	—	030-080	70-100	—	020-030 040-060
Familia B	120-130	—	110-120	110-130	—	100-120
Familia C	140-180	—	—	—	160-180	—

Tabla 2. Relación de las direcciones de fracturas predominantes para cada una de las formaciones estudiadas, según su escala de observación.

Otro aspecto importante es el carácter abierto o cerrado de cada fractura observa en campo (figura 13). Como se observa en las rosas de direcciones recogidas en la figura 14, no hay una relación entre grado de apertura de las fracturas y la familia a la que pertenecen.



Figura 13. Fotografías tomadas en la zona de estudio de campo (este de Salsadella). A) Fractura muy abierta. B) Fracturas abiertas. C) Fractura abierta por karstificación y tapizada luego por calcita recristalizada. D) Fracturas cerradas.

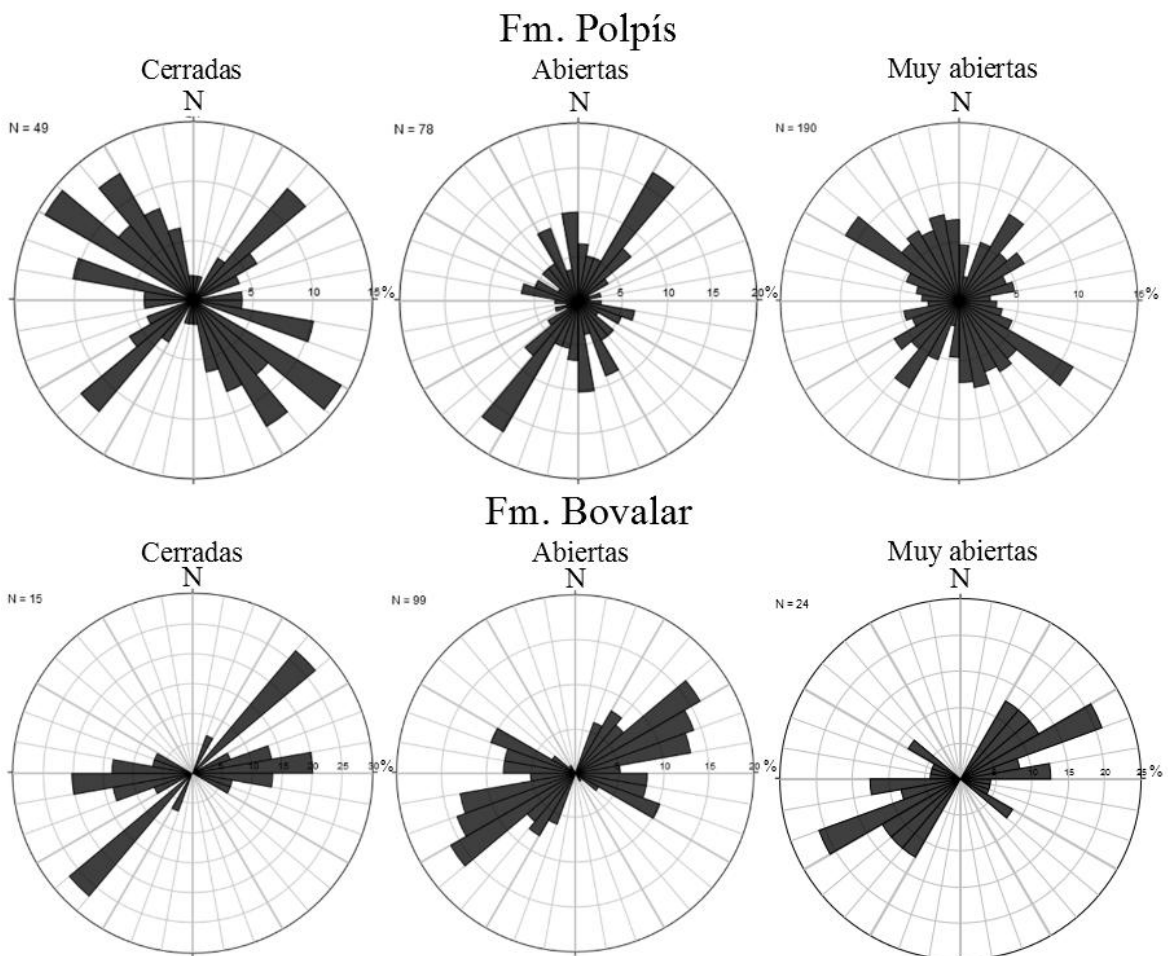


Figura 14. Distribución de las diaclasas de la Fm. Polpís según si son: Cerradas, Abiertas o Muy abiertas, y de la Fm. Bovalar según si son Cerradas, Abiertas o Muy abiertas.

También hemos estudiado en afloramiento los espaciados de cada familia. Como se observa en la tabla 3, la familia A presenta unos espaciados de entre 10 y 15 cm, diferenciándose bastante de los 36,88 cm que se observan para la familia A'. Si nos fijamos en la familia B, vemos que hay una variación entre la Fm. Polpís, con un espaciado de 14,75 cm, y la Fm. Bovalar, con 37,5 cm. Finalmente, la familia C solo se presenta en la Fm. Polpís y presenta un espaciado muy pequeño (6,10 cm).

Formaciones \ Familias	A	A'	B	C
Fm. Polpís	14,20 cm	—	14,75 cm	6,10 cm
Fm. Mas d'Ascla	10,96 cm	—	—	—
Fm. Bovalar	—	36,88 cm	37,5 cm	—

Tabla 3. Espaciados medios obtenidos a partir de los datos de campo para cada una de las familias identificadas en las diferentes formaciones.

Teniendo en cuenta la variedad de familias de fracturas, los espaciados de las mismas (no demasiado diferente entre sí) y la distribución de sus grados de apertura (también indistintos para cada formación), podemos concluir que la transmisividad hidráulica de las formaciones estudiadas a través de esas redes de fracturas sería aproximadamente isótropa en la horizontal, sin que pueda deducirse la existencia de una dirección preferente de flujo.

5.3. Análisis de las condiciones de esfuerzo para la fracturación hidráulica

Este análisis se realiza mediante un ensayo de compresión simple a partir del cual se obtiene, por una parte, la resistencia de la roca a la compresión e , indirectamente, la resistencia a la tracción de cada una de las formaciones (puesto que el *fracking* conlleva la formación de fracturas fundamentalmente de tracción); por otra parte, se calcula el número de Poisson de las muestras, parámetro necesario para simular las condiciones reales de esfuerzo en el subsuelo, tal como hemos explicado en el capítulo de Metodología.

La simulación del estado de esfuerzo natural a la profundidad máxima conocida para cada formación permitirá calcular la presión de fluidos necesaria para la realización de la fracturación hidráulica. Para esto necesitaremos obtener la presión litostática ($\sigma_z = \rho gh$) a dicha profundidad máxima y la presión horizontal ($\sigma_x = \frac{\rho gh}{m-1}$), para la cual utilizaremos el valor del número de Poisson.

5.3.1. Cálculo experimental del número de Poisson

Durante la realización del ensayo de compresión simple se anotaron los diferentes valores de deformación en los ejes Z y X para cada uno de los diferentes estadios de esfuerzos. Representando dichos valores en gráficas comparativas de la deformación unitaria e_z frente a la deformación e_x (Anexo 2), se ajustó una recta de regresión que expresaba la relación lineal óptima entre ambos grupos de valores, y a partir de esta relación se puede obtener el número de Poisson: $m = |e_z| / |e_x|$.

Como se puede ver en el Anexo 2, hay algunos casos en los que hay dos rectas posibles de ajuste (Mas d'Ascla 1). Esto se debe a que durante la toma de datos la colocación del pie de rey con el que se medía la deformación en el eje X inducía una variabilidad en los resultados. Las dos rectas de ajuste representan dos formas de medición, considerándose la correcta la que pasa por el origen de coordenadas.

5.3.2. Cálculo experimental de la línea de resistencia intrínseca

En un sistema de coordenadas σ - τ marcamos la posición del esfuerzo vertical en el momento de la rotura ($\sigma_1 = \sigma_{zR}$) y del esfuerzo horizontal ($\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_x = 0$) y construimos el círculo de Mohr de rotura (figura 15.A). Seguidamente localizamos dentro del círculo de Mohr la posición de los ángulos α de las fracturas formadas, y finalmente trazamos una línea tangente al círculo de Mohr que pase por los puntos correspondientes a dichos ángulos α . Extrapolando dicha línea hacia la izquierda obtenemos el valor de la cohesión C y estimamos la resistencia a la tracción T considerando que, en general, $C \approx 2T$.

5.3.3. Análisis del estado de esfuerzos en el subsuelo

Para el cálculo de los esfuerzos del subsuelo hemos tomado una profundidad h que corresponde a la profundidad máxima a la que se observan las unidades analizadas. Este dato se obtiene del corte geológico realizado en la figura 8. Consideramos un valor de densidad media para la columna de materiales situados por encima $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$.

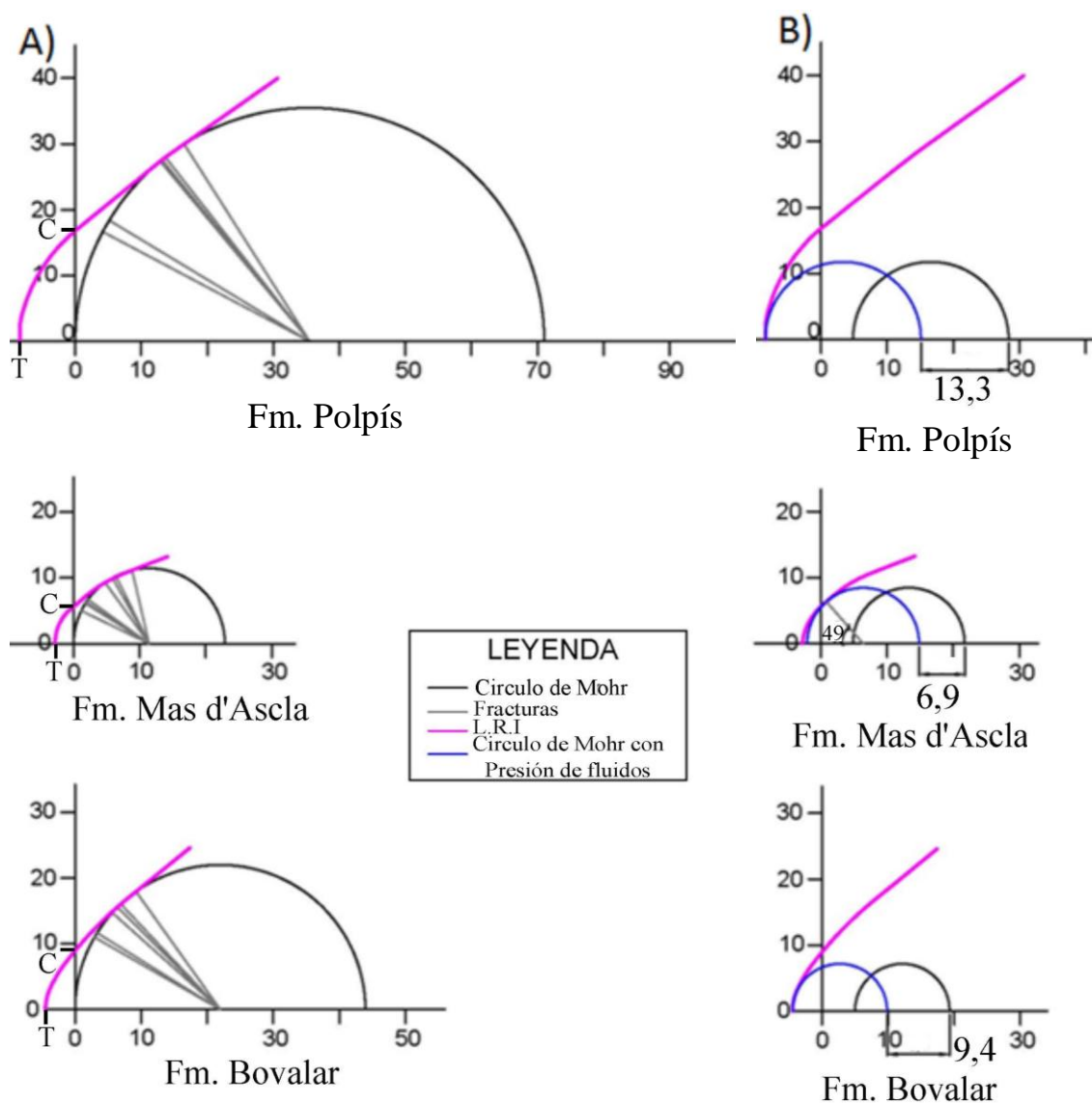


Figura 15. A) Aproximación de la línea de resistencia intrínseca (LRI) de cada una de las tres formaciones a partir de los ensayos de compresión simple realizados en el laboratorio (C: cohesión, T: resistencia a la tracción). B) Círculos de Mohr que representan los estados de esfuerzos litostáticos y el cálculo de la presión de fluidos necesaria para la fracturación.

Una vez tenemos los datos de la presión litostática pasaremos a calcular la presión horizontal para cada una de las formaciones, siendo los resultados obtenidos los adjuntos en la tabla 4, estos valores se representan mediante círculo de Mohr (en color negro en la figura 15.B).

	Fm. Polpís 2	Fm. Mas d'Ascla 1	Fm. Bovalar 1	Fm. Bovalar 2
Cohesión (MPa)	15,3	5,6	8,9	
Ángulo de rozamiento, μ (°)	35	23	39	
Resistencia a tracción (MPa)	7,65	2,8	4,45	
Número de Poisson, m	6,9	5,5	4,8	5,0
			4,9	
Profundidad, H (m)	1.070	820	730	
σ_z (MPa) ($= \rho \cdot g \cdot H$)	28,3	21,7	19,3	
$\sigma_x = \sigma_y$ (MPa) ($= \sigma_z / m - 1$)	4,8	4,8	5,0	
Presión de Fluidos (MPa)	13,3	6,9	9,4	
Tipo fractura	Tracción	Tracción + cizalla	Tracción	

Tabla 4. Síntesis de resultados numéricos obtenidos en el proceso de cálculo de los esfuerzos litostáticos y de la presión de fluidos necesarios para la fracturación.

A partir de los resultados adjuntos en la tabla 4, podemos observar que la resistencia a la tracción de las diferentes unidades es muy pequeña, siendo la Fm. Mas d'Ascla la que presenta menor resistencia (2,8 MPa) seguida de la Fm. Bovalar con 4,45 MPa y Polpís con 7,65 MPa. La menor resistencia de la Fm. Mas d'Ascla será beneficiosa para la fracturación únicamente de esta unidad.

Como se observa en la figura 15.B, ninguna de las formaciones se fracturaría en condiciones naturales, sino que necesitarán de una presión de fluidos para poderse fracturar, la cual pasaremos a calcular a continuación.

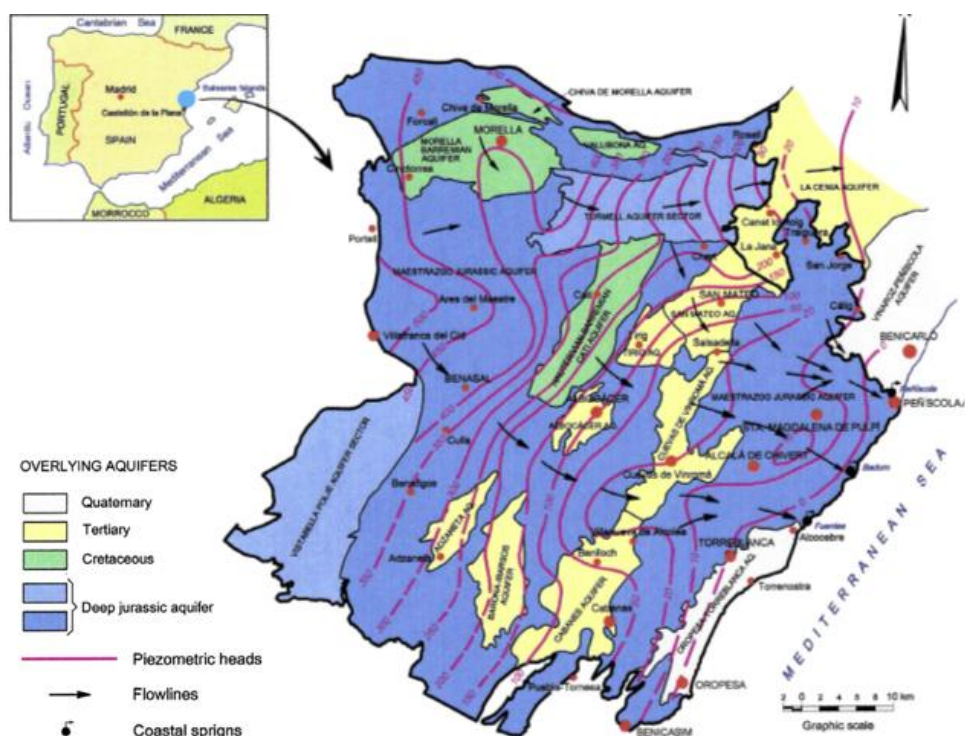
5.3.4. Cálculo de la presión de fluidos necesaria para la fracturación hidráulica

Una vez obtenidos los estados de esfuerzos en el subsuelo, podemos calcular la presión de fluidos necesaria para producir la fracturación hidráulica moviendo el círculo de Mohr hacia la izquierda hasta que entre en contacto con la LRI de cada roca. La presión de fluidos necesaria para que la roca se fracture será un valor de σ equivalente a dicha traslación horizontal. Como se observa en la tabla 4, la presión de fluidos necesaria para fracturar las diferentes unidades varía de entre 6,9 y 13,3 MPa, siendo Mas d'Ascla la de menor resistencia y Polpís la que presenta una resistencia mayor, por lo que, si la roca estuviera sana, se podrían inducir fracturas hidráulicas en Mas d'Ascla sin afectar a las otras dos.

En el caso que a nosotros nos atañe, la profundidad máxima a la que se encuentra la formación Mas d'Ascla sería de unos 800 m, de los cuales unos 500 m están saturados del agua del acuífero (presión hidrostática) y 300 m presentan únicamente presión litostática por estar formados por material rocoso. Por tanto, la Fm. Mas d'Ascla se encontraría inicialmente bajo una presión de fluidos de 50 bares (5 MPa). La inyección del fluido de fracturación habrá de hacerse a una presión en la boca del pozo suficiente para que a 800 m de profundidad se produzca el incremento de 5,0 a 6,9 MPa.

5.4. El acuífero del Maestrazgo

Para el análisis del posible riesgo de contaminación del acuífero debemos contar, lógicamente, con información acerca de su geometría y distribución del acuífero, el nivel piezométrico y el comportamiento de las diferentes unidades en función de su porosidad.



Como se observa en la figura 16 el acuífero del Maestrazgo es un acuífero de grandes dimensiones que está formado por varios acuíferos interconectados. El acuífero regional tiene su base en el Jurásico inferior, pero varía el nivel sobre el que se apoya, puesto que como hemos comentado anteriormente el Keuper no se encuentra en la totalidad de la zona de estudio sino que solo está presente en la zona oriental. Por tanto, en la zona occidental el acuífero deberá apoyarse sobre una unidad impermeable diferente, siendo esta el Muschelkalk medio (figura 17.A).

Del acuífero del Maestrazgo se extrae agua a través de un gran número de pozos, de los cuales algunos son para agua de boca. En figura 17.B se han localizado los pozos que se encuentran próximos a la zona donde hemos realizado el corte hidrogeológico (idéntica a la del corte geológico), y que han sido proyectados en éste.

Como se observa en la figura 17.A, la Fm. Mas d’Ascla se encuentra intercalada en el acuífero, existiendo una proximidad e incluso un contacto físico con unidades de porosidad media.

La empresa *Montero Energy* ha indicado, en informaciones transmitidas a los medios de comunicación, que en caso de no ser viable la extracción del gas de la Fm. Mas d’Ascla probaría con el Triásico medio o el Paleozoico superior. En este caso sí que habría una barrera impermeable entre las formaciones objeto de explotación y el acuífero, representada por las formaciones impermeables del Keuper y Muschelkalk medio. Sin embargo, hay una gran incertidumbre sobre las posibilidades reales de existencia de hidrocarburos en esas unidades más antiguas y sobre las posibilidades de prospectarlas y caracterizarlas adecuadamente puesto que se encuentra en niveles más profundos y su estructura es más compleja.

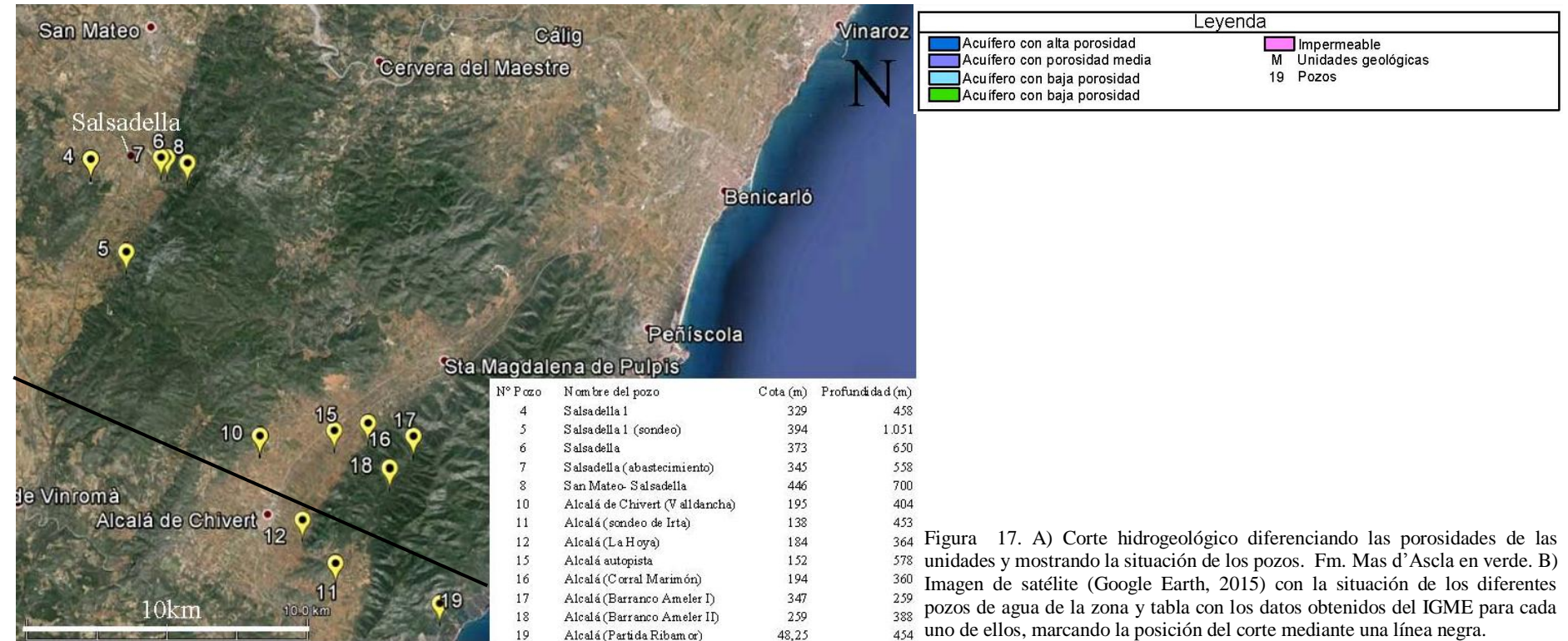


Figura 17. A) Corte hidrogeológico diferenciando las porosidades de las unidades y mostrando la situación de los pozos. Fm. Mas d'Ascla en verde. B) Imagen de satélite (Google Earth, 2015) con la situación de los diferentes pozos de agua de la zona y tabla con los datos obtenidos del IGME para cada uno de ellos, marcando la posición del corte mediante una línea negra.

5.5. *Análisis del riesgo de contaminación del acuífero*

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, podemos concluir que en caso de que la roca estuviera sana en condiciones naturales, la presión necesaria para la fracturación de la Fm. Mas d'Ascla no induciría fracturas en las unidades contiguas. Esto haría que no se transmitieran a ellas posibles fluidos contaminantes (fluidos de fracturación, fluido de retorno con posibles contaminantes naturales) y, por tanto, no habría peligro de afectar al acuífero. Pero, como hemos observado tanto a escala macroestructural como mesoestructural, estas circunstancias de roca sana no se dan en condiciones naturales, sino que nos encontramos frente a unas formaciones con una alta densidad de fracturación, y gran variedad de familias (NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW, WNW-ESE y NNW-SSE), muchas de ellas abiertas (en gran parte por karstificación). Ello implica una alta transmisividad a las formaciones permeables que, como se observa en el corte hidrogeológico, se encuentran muy próximas o contiguas a la Fm. Mas d'Ascla. Por tanto, puede interpretarse que existiría un peligro real de contaminación de este último.

6. **Análisis del posible riesgo de sismicidad inducida**

6.1. *El problema de la sismicidad inducida*

La sismicidad inducida ocurre cuando actividades humanas que implican inyección de fluidos al subsuelo (fracturación hidráulica, vertido de residuos líquidos en pozos, almacenamiento de gas) causan la reactivación de una falla latente. Los terremotos que induce la inyección del fluido no son "causados" realmente por ese proceso artificial, pero sí "detonados" por el mismo. Son terremotos que, tarde o temprano, se habrían producido en la zona, y la inyección los adelanta y los concentra en el tiempo. Por eso se habla también de "sismicidad anticipada". La sismicidad inducida se puede analizar desde dos frentes. Por una parte, se encontrarían la creación y propagación de fracturas debidas al propio *fracking*, las cuales no presentan problema puesto que casi nunca superan el umbral de percepción humana (siendo la máxima magnitud Richter de 3 (Shale gas España). Por otra parte, se considera la activación de fallas preexistentes, cuyo riesgo analizaremos en el apartado siguiente.

6.2. *Fallas activas en el Maestrat*

A partir de la tabla resumen de los datos de las fallas activas realizada por Simón (2013), basándose en los estudios realizados por Simón (1982), Simón et al. (2012), Simón et al. (2013), Perea (2006) e IGME (2012), podemos observar que hay un gran número de fallas activas en la zona (figura 18). Según las evidencias más o menos recientes de su actividad, se pueden diferenciar fallas activas del Plioceno y posiblemente en el Cuaternario (en azul en la figura 18), fallas activas durante el Cuaternario (en rosa) y fallas de la base de datos del QAFI (Quaternary Active Faults Database of Iberia v.2) (IGME, 2012).

Haciendo un resumen de estas fallas (Anexo 3), podemos observar que las longitudes de las que hay en la zona varían entre 5,8 y 14,5 km para la falla de Salsadella Norte y Alcalá de Xivert, respectivamente, lo cual nos da una variación en la magnitud del terremoto máximo potencial de entre 5,9 y 6,4. La mayoría de las fallas presentan un periodo de recurrencia estimado de entre 6.000 y 26.000 años, aunque en algunos casos no se tiene registro de este. Finalmente, se ha podido estimar la tasa media de movimiento para algunas de las fallas, el cual varía desde 0,02 hasta 0,30 mm/año.

La zona donde hemos realizado el estudio exhaustivo de la fracturación en el campo se situaría en las inmediaciones de la falla Salsadella centro, como se observa en el cuadrado verde que delimita la zona de estudio en la figura 18. En el caso de la zona situada más al este, donde la Fm. Mas d'Ascla

alcanza mayor profundidad, están las fallas activas de Alcalá de Xivert, Torreblanca y Sierra d'Irta, que muestran evidencias claras de actividad pleistocena. Sus tasas calculadas de movimiento son: 0,03 mm/año para la falla de Alcalá de Xivert; 0,04-0,06 mm/año en los últimos 3,6-5,0 Ma, 0,04-0,07 mm/año en los últimos 1,9-2,6 Ma, y 0,26-0,30 mm/año los últimos 253 ka para la de Torreblanca; 0,06-0,10 mm/año para la falla de Serra d'Irta (Simón et al., 2013).



Figura 18. Mapa de fallas activas cuaternarias de la zona de Castellón. Rojo: fallas registradas en la base de datos QAFI (IGME, 2012). Azul: fallas del Plioceno, posiblemente del Cuaternario. Rosa: fallas del Cuaternario. El recuadro verde delimita la zona donde se realizó el estudio detallado de la fracturación.

6.3. Análisis de las condiciones de esfuerzo para la reactivación de fallas activas

La reactivación de las fallas activas se puede realizar bien de forma natural, debido a que durante el paso del tiempo va acumulando tensión que posteriormente liberará en forma de seísmo, bien de forma artificial, por la alteración del medio y los esfuerzos de la zona. En nuestro estudio nos interesa el segundo caso.

La reactivación de fallas por la acción humana puede deberse directamente a un aumento de la presión de fluidos en la propia superficie de falla. Esta presión se va distribuyendo y se va perdiendo conforme se aleja del punto de inyección. Para que la falla pueda reactivarse debe existir continuidad hidráulica entre las fracturas en que se inyecta y la superficie de falla, quedando esta dentro de la zona afectada por el cambio de presión. Pero incluso aunque estemos en una zona sin conductividad hidráulica, podría haber reactivación debido a la inestabilidad que se crea en el campo de tensiones, produciéndose reacciones en cadena que desestabilizan otras fallas y pudiendo incluso afectar a fallas de grandes dimensiones.

En nuestra zona de estudio, como hemos visto, estamos trabajando con una alta densidad de fracturación, la cual haría que la conductividad del terreno sea alta, además como tenemos la confirmación de la presencia de fallas activas en la zona de estudio, no es muy difícil que la conductividad llegara a afectar directamente las fallas de mayores dimensiones.

6.4. *Discusión: las enseñanzas del “Proyecto Castor”*

Según información transmitida por Recaredo del Potro, presidente de la empresa Escal UGS que construyó el almacén de gas Castor, en una comparecencia en Valencia, durante la inyección de gas en dicho almacén se pudo provocar una sobrepresión de 7 u 8 bares (EFE, en línea). Estos se añadirían a los 170 b que el fluido ya tenía en el almacén, debidos a la presión hidrostática que tenía previamente por encontrarse a 1700 m de profundidad y existir hasta ahí una columna continua de agua. Vemos pues que bastó un pequeño incremento relativo de la presión de gas para inestabilizar las fallas del alrededor y que se produjera sismicidad inducida.

En el caso que a nosotros nos atañe, la profundidad máxima a la que se encuentra la formación Mas d'Ascla (unos 800 m), hemos visto que exigiría crear una sobrepresión de 19 bares (1.9 MPa) para la fracturación hidráulica. Este valor es superior al aplicado en el caso del proyecto Castor. Realmente no conocemos bajo qué presión se reactivarán las fallas en la zona, sino que únicamente conocemos la presión necesaria para la formación de fracturas de neoformación, puesto que la reactivación o no de las fallas activas de la zona dependerá del punto en el que se encuentren dentro de su ciclo sísmico. Si está cercana al punto de reactivación, con poca presión añadida las fallas podrían activarse (como fue el caso del Castor); en cambio, si está lejos de su punto de rotura haría falta más presión para su reactivación. En cualquier caso, la probabilidad de reactivación sería elevada, y este riesgo exigiría un estudio en profundidad de las condiciones reales de esfuerzo en el subsuelo mediante mediciones *in situ* como las que describen González de Vallejo et al., (2002, p.218-229).

7. Conclusions

The accomplishment of a *fracking* project in the Maestrat zone would probably produce problems of contamination of the Maestrat aquifer and induced seismicity. The Mas d'Ascla formation needs less fluid pressure for fracturing than the neighbouring formations. Therefore, if *fracking* would be performed with the necessary caution, only the Mas d'Ascla unit would fracture, and the aquifer would not be contaminated. Nevertheless, we consider that there would be real risk of aquifer contamination due to: 1) *High fracture density* in the zone, which gives rise to high hydraulic transmissivity. 2) *Location of Mas d'Ascla Formation within the aquifer*, since it has hydraulic connection with permeable units. 3) The thickness of series affected by the observed faults, which reaches 850 m.

With regard to induced seismicity, we do not consider to be worrying the microseismicity produced by the *fracking* process, because the seisms are very small and humans cannot perceive them. On the contrary, it is important the risk of induced seismicity owing to active faults reactivation. Risk factors are the following: 1) There exist *presence of active faults, coherent with the present-day stress field* (E-W extension) due to the Gulf of Valencia rifting. 2) *High hydraulic transmissivity of rocks* could permit that overpressure arrives to active fault surfaces. From the experience of the Castor Project, which demonstrated that a small overpressure in the gas reservoir is sufficient to induce seismicity in neighbouring active faults, we can conclude that there exists a danger of reactivation of the Alcalá de Xivert, Torreblanca-north and Serra d'Irta faults in the case that the fluid was injected to the necessary pressure for fracturing the Mas d'Ascla Formation.

8. Bibliografía

Capote, R., Muñoz, J.A., Simón, J.L, Liesa, C.L. y Arlegui, L.E. (2002): Alpine Tectonics I: The Alpine System north of the Betic Cordillera. En: *The Geology of Spain*. (W. Gibbons y T. Moreno, eds.). Geological Society, London, 367-400.

Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas (en línea). Gas no convencional en España, una oportunidad de futuro (última modificación, 2013). Disponible en: <http://ingenierosdeminas.org/documentos/130312_informe_gas.pdf>

Dunham, R.J. (1962): Clasification of carbonate rocks according to depositional textures. En: *Classification of Carbonate Rocks (Symposium)*:108-121.

EFE (en línea). La empresa del Castor reconoce que pudo haber “forzado” los seísmos. El Mundo, (última modificación, 05/03/2014). Disponible en: <<http://www.elmundo.es/comunidad-valenciana/2014/03/05/53173f6c22601d92388b456f.html>>

Esnaola Gómez, J.M y Martín Fernández, M. (1972): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 594 (Alcalá de Chivert) y memoria*. IGME, Madrid. 18 p.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002): *Ingeniería geológica*. Pearson educación, Madrid, 715 p.

Google Earth (en línea) (Última modificación, 20/05/2015).

Gutiérrez-Marco, J.C., Sánchez-Moya, Y., Gómez, J.J., Mas, R., García, A. y Lago, M. (2004): Cordilleras Ibérica y Costero-Catalana. En: *Geología de España* (J.A.Vera, ed.). Editorial Pral, Madrid, 465-530.

IGME: *Tabla de sondeos profundos*. Instituto Geológico y Minero de España, Valencia.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (en línea). Quaternary Active Faults Database of Iberia v.2 (última modificación, 2012). Disponible en: <<http://info.igme.es/qafi/>>

Klimowitz, J., Hernández, E., y Ruiz, G. (2006): *Metodología de caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la unidad hidrogeológica 08.07 “El Maestrazgo”*. HIPROMA. Asistencia técnica: Interpretación de perfiles sísmicos y sondeos profundos de hidrocarburos.

Martín García, L., Leyva Cabello, F. y Canerot, J. (1972): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 571 (Vinaroz) y memoria*. IGME, Madrid. 20 p.

Mejías M., Ballesteros, B.J., Antón-Pacheco, C., Domínguez, J.A., Garcia-Orellana, J., Garcia-Solsona, E. y Masqué, P. (2012): Methodological study of submarine groundwater discharge from a karstic aquifer in the Western Mediterranean sea. *Journal of Hydrology*, 464-465: 27-40.

Ministerio de Industria, Energía y Turismo (en línea). Mapa de posición de sondeos, permisos y concesiones de explotación de hidrocarburos (última modificación, Marzo 2014). Disponible en: <<http://www6.mityc.es/aplicaciones/energia/hidrocarburos/petroleo/exploracion2014/mapas/inicio.html>>

Perea, H. (2006): *Falles actives i perillositat sísmica al marge nord-occidental del solc de Valencia*. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, 317 p.

Permanyer, A., Marfil, R., Salas, R. y de la Peña, J.A., Dorronsoro, C. y Rossi, C. (2000): Materia orgánica y diagénesis de la formación de margas del Mas d’Ascla (Jurásico superior) de la cuenca del Maestrazgo (Cadena Ibérica oriental). *Geogaceta*, 28: 117-120.

Price, N. J. (1966): *Fault and joint development in brittle and semibrittle rock*. Pergamon Press, Oxford, 176 p.

Roca, E. y Guimerà, J. (1992): The Neogene structure of the eastern Iberian margin: structural constraints on the crustal evolution of the Valencia trough (western Mediterranean). *Tectonophysics*, 203: 203-218.

Salas, R. y Casas, A. (1993): Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy, and crustal evolution during the Alpine cycle of the eastern Iberian basin. *Tectonophysics*, 228: 33-55.

Salas, R. y Guimerà, A. (1996): Rasgos estructurales principales de la cuenca cretácica inferior del Maestrazgo (Cordillera Ibérica oriental). *Geogaceta*, 20 (7): 1704-1706.

Salas, R. y Permanyer, A. (2003): Evidencias de generación de hidrocarburos en la formación de margas del Mas d'Ascla (Jurásico superior, Cadena Ibérica oriental) y su relación con el campo de Amposta de la Cuenca de Tarragona. *Boletín Geológico y Minero*, 114 (1): 75-86.

Shale gas España (en línea). Sismicidad inducida y fracturación hidráulica (fecha de consulta: 15/09/2015). Disponible en: <<http://www.shalegasespana.es/es/docs/factsheets/Sismicidad-inducida-y-fracturacion-hidraulica.pdf>>

Simón Gómez, J.L. (1982): *Comprensión y distensión alpinas en la Cadena Ibérica oriental*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 269 p.

Simón, J.L., Arlegui, L.E., Lafuente, P. y Liesa, C.L. (2012): Active extensional faults in the central-eastern Iberian Chain, Spain. *Journal of Iberian Geology*, 38: 127-144.

Simón Gómez, J.L. (2013): *Valoración del riesgo de sismicidad inducida por eventuales operaciones de fracking en el entorno de fallas activas en el norte de la provincia de Castellón*. Inédito.

Simón, J.L., Pérez-Cueva, A.J. y Calvo-Cases, A. (2013): Tectonic beheading of fluvial valleys in the Maestrat grabens (eastern Spain): insights into slip rates of Pleistocene extensional faults. *Tectonophysics*, 593: 73-84.

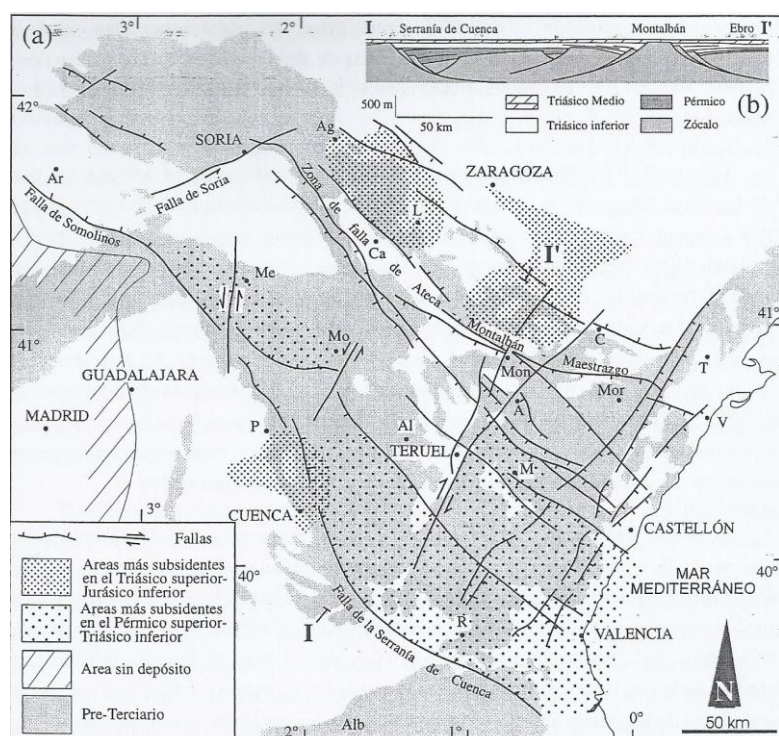
AGRADECIMIENTOS:

Mis agradecimientos a Marcos Aurell, por la colaboración en la observación de lámina delgada, a Lope Ezquerro por la ayuda prestada en el laboratorio durante la realización del ensayo de compresión simple y a Magdalena Palau y Carina Bellmunt por la paciencia que tuvieron al acompañarme a las jornadas de campo.

Finalmente, agradecer a José Luis Simón la paciencia durante la realización de este trabajo.

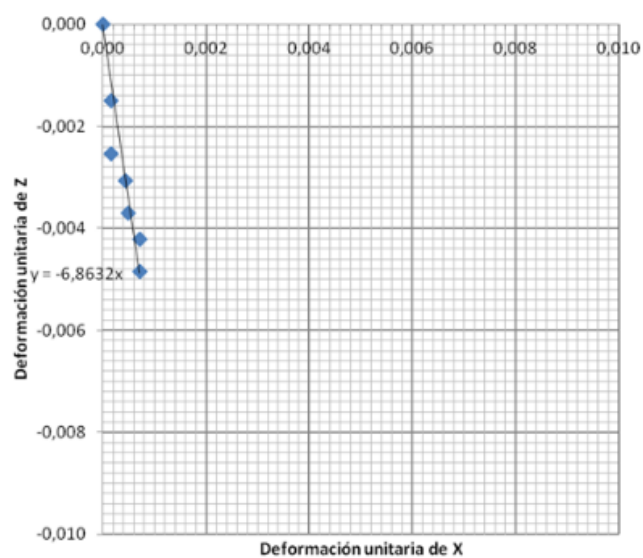
Anexos

Anexo 1. Paleogeografía de la Cuenca Ibérica en el ciclo Pérmico superior-Jurásico inferior



Esquema de la Cuenca Ibérica durante los dos periodos principales de *rift* incluidos en el ciclo Pérmico superior-Jurásico inferior (Capote et al., 2002).

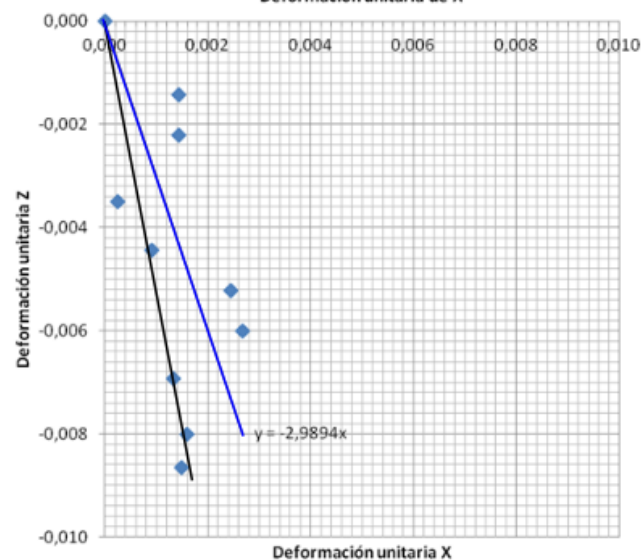
Anexo 2. Gráficas cálculo empírico del número de Poisson



Fm. Polpís 2

$m = 6,9$.

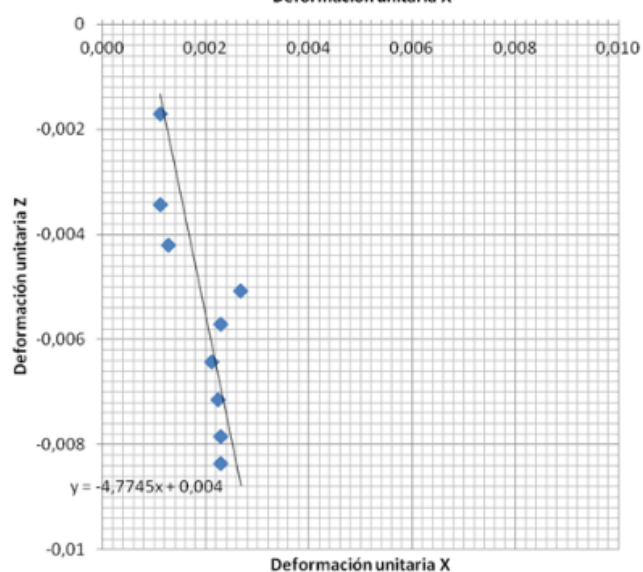
Resistencia a compresión simple = 71,018 MPa.



Fm. Mas d' Ascla 1

$m = 5,5$

Resistencia a compresión simple = 22,899 MPa.



Fm. Bovalar 1

$m = 4,8$.

Resistencia a compresión simple = 52,217 MPa.

Gráficas comparativas deformación de Z frente la deformación de X, con representación de la recta de tendencia, para calcular de forma empírica el número de Poisson.

Anexo 3. Tabla de fallas activas en la zona del Maestrat.

FALLA (O SEGMENTO DE FALLA)	Longitud (km)	Magnitud del máximo terremoto potencial	Tasa media de movimiento (mm/año)	Periodo de recurrencia estimado (años)	Fuentes de información
1. Catí norte	6,0	5,9	0,045	6000	[8, 13, 15]
2. Catí sur	12,5	6,3	0,045	12.000	[8, 13, 15]
3. Albocàsser norte	6,5	5,9	0,04	7000	[8, 13, 15]
4. Tirig norte	14,2	6,3	0,03	20.000	[8, 13, 15]
5. Tirig sur	8,6	6,2	0,045	8000	[8, 13, 15]
6. La Valltorta	7,6	6,0	0,02-0,04		[8, 10]
7. Torre-Endomèneh	10,3	6,2	0,02		[8, 10]
8. Salsadella centro	9,5	6,2	0,02	26.000	[8, 13, 15]
9. Salsadella norte	5,8	5,9	0,02	15.000	[8, 13, 15]
10. Alcalà de Xivert	14,5	6,4	0,03	22.000	[8, 13, 15]
11. Torreblanca norte	10,2	6,2	0,04-0,06 (a) 0,04-0,07 (b) 0,26-0,30 (c)		[8, 12]
12. Serra d'Irta	9,3	6,2	0,06-0,10	10.000	[8, 12, 13, 15]

Tabla resumen de las fallas activas en la zona del Maestrat (a) tasa media en los últimos 3,6-5,0 Ma; (b) Tasa media en los últimos 1,9 – 2,6 Ma; (c) Tasa media en los últimos 253.000 años (Simón, 2013).